

内面補強した覆工へのファイバー コンポジットモデル解析の適用性に関する研究

A STUDY ON THE FIBER COMPOSITE ANALYSIS TO THE INNER REINFORCED TUNNEL LININGS

中田 雅博*, 佐野 信夫*, 朝倉 俊弘**, 若菜 和之***, 岩館 憲一****
Masahiro NAKATA, Nobuo SANO, Toshihiro ASAKURA, Kazuyuki WAKANA and Ken-ichi IWADATE

A study by model experiments and numerical analyses has been made in order to estimate the effect of inner reinforcement for deformation tunnels. The fiber composite analysis, one of the methods of numerical analyses, consists of FEM beam elements in which a section of element is divided into fine fibers, and material properties are calculated from the combination of fiber properties. Non-linear behavior such as cracks are evaluated by tensile stress of each fiber.

We reported the application of this method on non-reinforced linings last year, and in this paper, reinforced tunnel lining are simulated by the same model, and verified applicability of this method by comparing with the experimental results.

Keywords: tunnel, inner reinforcement, fiber composite analysis

1. まえがき

筆者らは、覆工コンクリートの補強対策の効果を検証し補強設計に活かすために、覆工の力学的挙動に関する模型実験と各種数値解析を実施してきた^{1) 2)}。このうち、数値計算については、直接設計に利用するフレーム解析、覆工と地盤の応力状態を算定するFEM解析、ひび割れ発生後の大変形挙動を模擬する不連続変形法解析(DDA; Discontinuous Deformation Analysis)、それに加えてファイバーコンポジットモデル解析の4種類の手法について、適用性の検討を行ってきた³⁾。

このうちファイバーコンポジットモデル解析は、断面内の応力分布を簡易にモデル化して、ひび割れ発生にともなう中立軸の移動を考慮できる手法であるため、炭素繊維補強シートや鋼板接着によるひび割れ後の変位抑制効果を算定できるものと期待される。

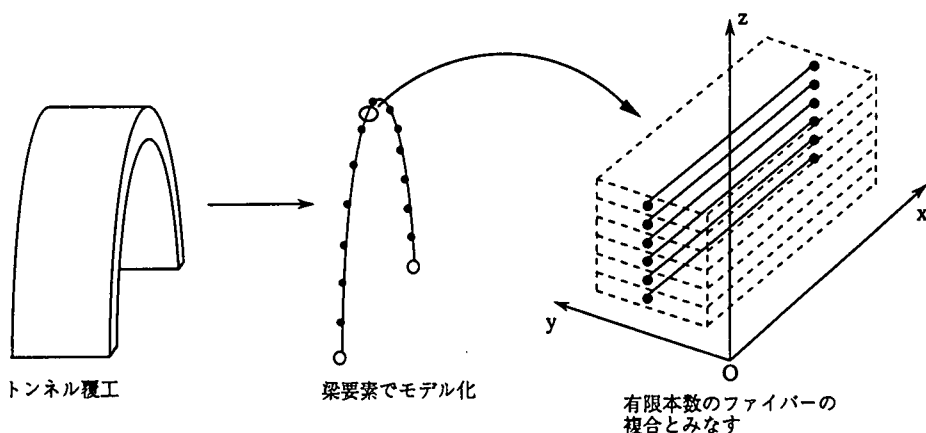
ここでは、昨年度までに実施した模型実験の無補強のケースの解析に加えて、金属板と炭素繊維補強シートの接着による補強ケースに関して、変形挙動解析への適用性を検討した。

-
- | | | | | |
|------|-----|--------------|----------|------------|
| * | 正会員 | 日本道路公団 | 試験研究所 | トンネル研究室 |
| ** | 正会員 | (財)鉄道総合技術研究所 | 技術開発事業本部 | 構造物技術開発事業部 |
| *** | 正会員 | ショーボンド建設株式会社 | 土木研究所 | |
| **** | | 株式会社富士総合研究所 | 解析技術第1部 | |

2. 解析手法の特徴

複合部材の非線形解析に用いられるファイバーコンポジットモデルは、部材断面を有限本数のファイバーの複合であると見なして、有限要素法（FEM）のはり要素を構成するモデルである。これらのファイバーのそれぞれに一定の破壊基準を導入することで、切断の判定を行ない、ひび割れを表現することができる¹⁾。

ファイバーコンポジットモデルでは、断面内のひずみ分布が深さ方向に線形であると仮定することで、はり要素の断面を構成するファイバーのそれぞれの軸応力を計算し、それによって切断の判定を行なう。さらに、切断したファイバーの剛性を低下させ、中立軸の移動と要素の断面定数を変化させることで曲げひび割れ発生を模擬する。これにより、ひび割れ発生領域を大まかに評価することができる。また、この手法は通常のフレーム解析と同程度の作業と計算時間でモデルの作成と解析を行なうことができるため、適用性の検討が十分に行なわれていれば、比較的容易に実際の問題に適用できる。図—1にファイバーコンポジットモデルの要素モデル化の例を示す。



図—1 ファイバーコンポジットモデルの要素モデル化例

3. 解析内容

3・1 解析ケース

縮尺1/30の新幹線標準トンネル断面を模擬したモルタル造覆工模型によるひび割れ実験を、本解析手法で再現することを試みた。実験装置を図—2に示す。

ここで対象とする解析ケースは、1) 無補強、2) プリキ板補強、3) 炭素繊維補強の各ケースである。荷重条件はいずれのケースも天端位置への鉛直集中荷重とする。模型実験では載荷板を介して変位制御で荷重を加えているが、本解析では載荷点の節点（一点）への強制変位ととして荷重を加える。また実験で反力板を介して接続している地盤ばねは、圧縮方向とせん断方向に有効な非線形ばねとしてモデル化し、各節点に接続する。脚部はインバートのある覆工を模擬しているため、鉛直・水平双方に対して固定されたピン結合の条件とする。

解析ケースおよび物性値の一覧を表—1に、解析モデル図を図—3に示す。ここでコンクリートの引張強度については曲げ引張強度を採用している。

表-1 解析ケースおよび物性値一覧

		D29201	D29202	D29203
載荷位置		天端	天端	天端
補強方法		なし	ブリキ板 $t=0.3\text{mm}$	炭素繊維シート 50g/m^2
補強範囲		—	120°	120°
コンクリート 物性値	$A(\text{mm}^2)$	1.2×10^3	1.2×10^3	1.2×10^3
	$E(\text{kgf/cm}^2)$	1.55×10^5	1.55×10^5	1.55×10^5
	$\sigma_t(\text{kgf/cm}^2)$	40	40	50
補強材 物性値	$A(\text{mm}^2)$	—	18.0	10.8
	$E(\text{kgf/cm}^2)$	—	2×10^6	4.2×10^5
	$\sigma_t(\text{kgf/cm}^2)$	—	4.0×10^3	3.55×10^4

A：断面積

E：弾性係数

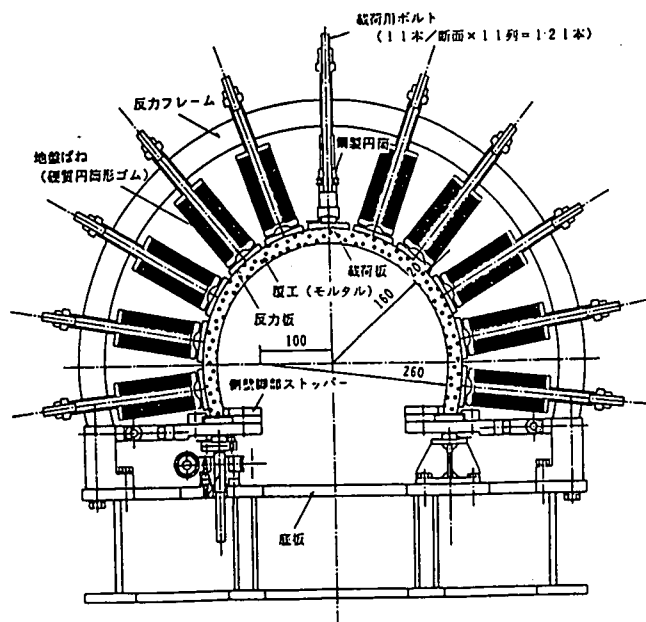
 σ_t ：引張強度

図-2 覆工模型実験装置

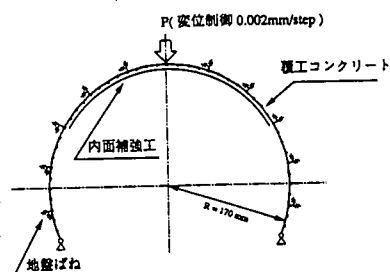


図-3 解析モデル図

3・2 覆工のモデル化

解析では、覆工コンクリート断面は20本のファイバーで表現し、モルタルに相当する物性値をそれぞれに与える。内面補強工の評価をするために、金属板・炭素繊維シートを断面を構成するファイバーの一本であるとして、等価な弾性係数と断面積を与えて一つの要素にモデル化する。従って、モルタルを表現するファイバーと内面補強工のひずみは連続的に変化すると考えられ、両者の間のすべり、剥離は考慮していない。覆工の周方向は5度ピッチで要素分割する。

実験では、載荷点直下の一次ひび割れ発生後に補強処置を行うため、解析でも実験での補強工設置時期に合わせて補強工の剛性が有効になるように処理されている。従って、無補強と補強のそれぞれのケースで、一次ひび割れ発生以前の挙動は等しい。

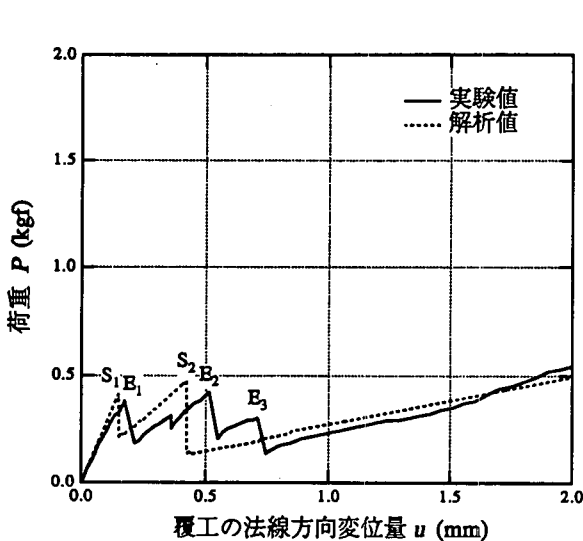
4. 解析結果

解析結果として、載荷重 P と覆工の法線方向変位量 u の関係 (P - u 曲線)、ひび割れ発生判定位置を実験結果と合わせて図—4 から図—9 に示す。各ケースとも、ひび割れが発生すると、断面内の応力状態を新たな安定状態に置き換えるための解放力が加えられ、変形が進行するため、載荷重の低減が見られる。

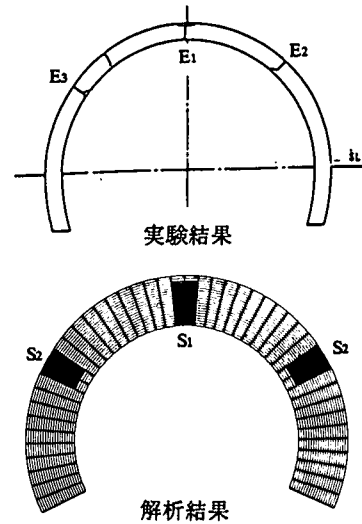
各ケースの解析結果を概観し、以下に述べる。

4・1 D29201 (図—4、5)

一次ひび割れ発生時の載荷重と変位、一次 (天端) 及び二次 (肩) ひび割れ発生位置、ひび割れ発生後の剛性低下について、実験との良い一致が見られる。二次ひび割れの発生荷重に関しては、実験では対称性が損なわれていることを勘案すると、ほぼ一致していると考えられる。ひび割れ発生後の載荷重低減に関しては、同じ条件のD29201～D29203でも違いが見られることから実験のばらつきの範囲内と考えられる。



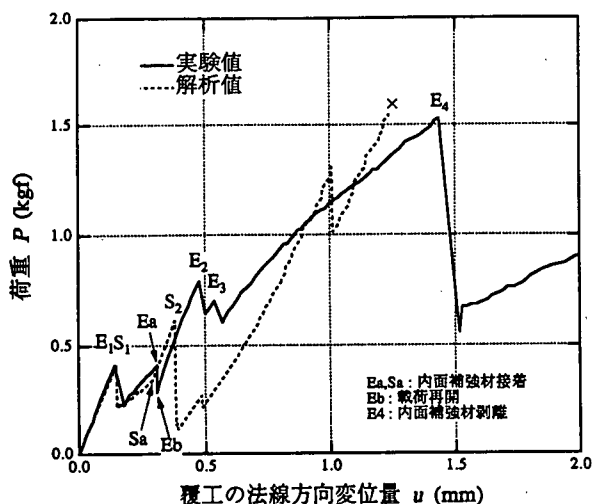
図—4 載荷点の荷重と変位量の関係 (D29201)



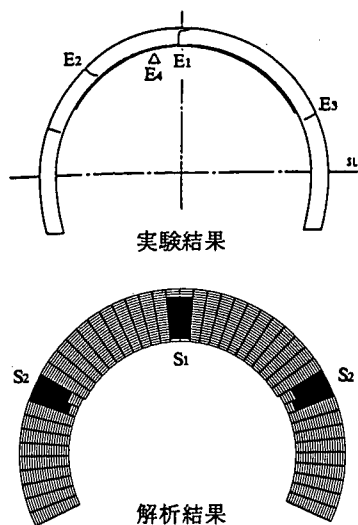
図—5 ひび割れ発生位置 (D29201)

4・2 D29202 (図—6、7)

このケースでは一次ひび割れ発生後載荷を中断し、補強工 (ブリキ板 $t=0.3\text{mm}$) を行っている。実験において一次ひび割れと二次ひび割れの間に載荷重の低下 ($Ea \rightarrow Eb$) と剛性の回復 ($Eb \rightarrow E2$) が見られるのはそのためである。解析では実験と同一時点より補強工の剛性を有効にした (Sa)。解析では一次ひび割れ発生時の載荷重と変位量 ($S1$)、補強工の効果による剛性回復と変形の抑制 ($Sa \rightarrow S2$) までは良い一致が見られる。しかし、二次ひび割れ発生荷重は実験より小さく載荷重の低下はより大きい ($S2$)。また、実験では最初の肩部のひび割れが補強範囲内 ($E2$) に発生していることから、解析結果に相違が生じている。一方それ以降の P - u 曲線の傾きは実験よりもやや急であり、変位量が約 1mm に達した段階でひび割れが貫通状態に近くなり、計算結果が不安定になったため計算を打ち切った。



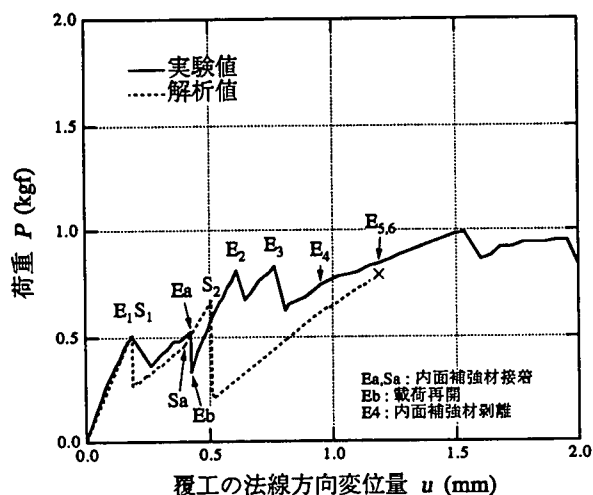
図一6 載荷点の荷重と変位量の関係 (D29202)



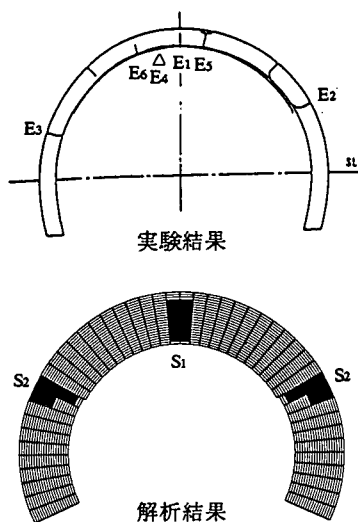
図一7 ひび割れ発生位置 (D29202)

4・3 D29203 (図一8、9)

この解析ケースにおいても、一次ひび割れ発生後載荷を中断し、補強工を行っている (Ea)。二次ひび割れ発生荷重が実験より小さいこと (S2)、ひび割れ発生時の載荷重の低下が実験より大きく現われること、二次ひび割れ以降の剛性が実験よりやや高いことなどはD29202と同様の傾向が見られる。また、やはり変位量1mmを越えた付近で極端に剛性低下した要素が生じたことによると思われる不安定な結果が現われたため計算を打ち切った。二次ひび割れまでのひび割れ発生位置は実験とほぼ一致している。



図一8 載荷点の荷重と変位量の関係 (D29203)



図一9 ひび割れ発生位置 (D29203)

5. 適用性に関する検討

今回の解析で、補強工を施したケースでも一次ひび割れ発生荷重と発生領域、ひび割れ発生後の剛性低下については実験結果とよく一致することがわかった。

D29201からD29203までを比較すると、補強による変位抑制効果が現われていることが確認され、この条件においては補強処置の効果を評価できることがわかる。一方、実験のひび割れは単独のひび割れが進展する形態であるのに対して、解析では分布ひび割れモデルであるため、ひび割れが広がりを持った領域として評価されるという違いがある。そのため、ひび割れがある程度以上進展した後の挙動に関しては、現われる数値の信頼性を保つのが難しい。

ひび割れが大きく進展した後のひび割れ発生領域と荷重変位関係は実験との相異が大きくなる。特に、補強材接着などにより断面方向の応力分布が複雑になるケースでは、ひび割れ位置を的確に推定できなくなる。従って、本手法の適用性を高めていく事と、適用限界を見究めることが今後の課題となる。また、この手法を補強工法の評価と設計に具体的にどのように取り込んでいくか検討する必要がある。

また、ひび割れの進展に関しては、本手法が線形のひずみ分布のみを考えていることなどから、実スケールのトンネルに関しては、実際のひずみ軟化曲線を正しく追えないことが予想され、これらを応力分布や剛性の低減、破壊の判定などに考慮していくことが課題となる。

以上をまとめると、

- 1) 二次ひび割れ発生以前までの荷重-変位関係を模擬することが可能である。
- 2) 二次ひび割れまでのひび割れ発生位置について推定が可能である。
- 3) 内面補強工による変位抑制効果が評価できる。
- 4) ひび割れが進展した状況（模型実験では概ね変位量1mm超）以降に関しては計算が安定して行えない。
- 5) 実スケールのトンネル部材への適用は、寸法効果への配慮などを行って慎重に行う必要がある。

といったことが言える。

今後は、より様々なトンネルサイズ・形状や荷重条件に関しても適用性が保たれるかどうかを検査して、トンネル覆工の補強処置の評価に活かせるよう整備して行きたい。

なお、本研究は日本道路公団試験研究所と（財）鉄道総合技術研究所、およびショーボンド建設（株）の3者の共同研究の成果の一部をとりまとめたものである。最後に、本研究にご協力いただいた日本道路公団中野清人氏、（財）鉄道総合技術研究所小島芳之氏、ショーボンド建設（株）小俣富士夫氏、（株）間組鈴木雅行氏、坂田英一氏、鉄建建設（株）松岡茂氏に深甚なる謝意を表する次第である。

6. 参考文献

- 1) 朝倉、小島、安東、佐藤、松浦：トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究、土木学会論文集No.493/Ⅲ-27、pp.79～88、1994.6
- 2) 朝倉、安東、小俣、若菜、松浦：欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果、土木学会論文集No.493/Ⅲ-27、pp.89～98、1994.6
- 3) 中田、佐野、朝倉、小俣、若菜：トンネル覆工の力学挙動評価への各種解析手法の適用性に関する研究、トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻、1994.11
- 4) 朝倉、安東、小島、伊東、山本：トンネル覆工のひび割れ進展シミュレーション、第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.66～70、1993.2